

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190618

# 基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估

田鑫<sup>1</sup>, 张健<sup>2</sup>, 李雪亮<sup>1</sup>, 赵龙<sup>1</sup>, 曾军<sup>1</sup>, 张宁<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250001; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 我国可再生能源持续快速发展, 装机规模不断扩大, 其中光伏发电已成为我国电源增长的主力。随着光伏发电装机规模的快速增长, 多种制约因素导致的弃光限电问题突出, 阻碍着光伏产业的健康可持续发展。研究未来大规模光伏发电并网条件下的光伏消纳能力, 有助于引导光伏发电的科学规划和合理布局。提出了基于时序运行模拟的可再生能源消纳特性分析方法。通过光伏发电出力序列重构技术和对电力系统详细网络拓扑模型及线路约束的精细化建模, 能够实现对未来高比例光伏发电接入电力系统背景下光伏发电消纳能力的精细化量化评估。最后利用所提方法对山东电网 2025 年光伏发电消纳能力进行了评估。结果表明光伏发电装机规模扩大到规划装机的 2 倍时, 弃光比例仍将保持在合理水平。

**关键词:** 电力系统时序运行模拟; 光伏发电; 消纳能力; 弃光

## Evaluating photovoltaic accommodation ability for the Shandong power system based on sequential operation simulation

TIAN Xin<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, LI Xueliang<sup>1</sup>, ZHAO Long<sup>1</sup>, ZENG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>2</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** China's renewable energy continues to develop rapidly with increasing installed power generation capacity, with solar photovoltaic (PV) power becoming the main source of newly installed capacity. With the rapid growth of PV power generation, the problem of PV curtailment caused by various constraints is prominent, hindering the sustainable development of the PV industry. It is urgent to study the PV accommodation ability under large-scale photovoltaic power integration to guide the planning and allocation of PV power generation. This paper proposes an evaluation method of PV power generation accommodation based on sequential operation simulation. With PV power output sequence reconstruction technology, power system detailed network topology, and transmission constraints modeling technique, the PV accommodation ability of the power system can be quantitatively evaluated under the background of high proportion PV power generation integrated to the power system. Taking the planned power grid of Shandong Province in 2025 as an example, the PV accommodation ability is evaluated with the proposed method. The results show that when the installed PV power capacity expands to twice the planned installed capacity, the curtailment of PV power generation will remain at a reasonable level.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Comprehensive Evaluation Methods for Power Grid Planning under the Condition of Energy Internet and Large-scale New Energy Power Generation Grid-integration".

**Key words:** power system sequential operation simulation; photovoltaic power generation; accommodation ability; photovoltaic curtailment

## 0 引言

在国家能源战略和可再生能源发展政策的积极

推动下, 我国可再生能源持续快速发展, 装机规模不断扩大<sup>[1]</sup>。截至 2018 年底, 我国可再生能源发电装机达到 7.28 亿 kW, 同比增长 12%, 可再生能源发电装机占全部电力装机的比例约为 38.3%<sup>[2]</sup>。2018 年全国光伏发电装机达到 1.74 亿 kW, 其中新增装机 4 426 万 kW, 同期火电新增装机为 4 119 万 kW, 继 2017 年新增装机容量首次超过火电后, 光伏发电

**基金项目:** 国家重点研发计划资助 (2016YFB0900100); 国家电网公司科技项目资助“能源互联与大规模新能源发电并网条件下电网规划综合评估方法研究”

继续保持新增装机容量的领先,已成为我国电源增长的主力<sup>[3]</sup>。可再生能源发电量也不断增加,2018年可再生能源发电量达1.87万亿kW·h,占全部发电量比重约为26.7%,其中光伏发电1775亿kW·h,同比增长50%<sup>[3]</sup>。

近年来,受光伏发电装机规模快速增长、电网调峰能力不足、远距离大容量输电能力短缺、市场消纳机制不健全等因素制约,我国弃光限电的问题突出<sup>[4]</sup>。国家发展改革委、国家能源局联合印发的《清洁能源消纳行动计划(2018-2020年)》制定了2020年弃光率低于5%的目标<sup>[5]</sup>。随着未来光伏发电装机规模的进一步扩大,光伏发电会面临新的制约瓶颈,将严重阻碍光伏产业以及电力行业的健康可持续发展。对未来光伏发电的科学规划和合理布局必须建立在精细化的量化分析基础之上<sup>[6]</sup>。因此,在大规模光伏发电并网的背景下,亟需开展光伏消纳能力的研究,分析光伏消纳的影响因素,为光伏发电的发展规划提供依据,引导光伏发电的合理布局,提升其利用效率,促进我国可再生能源的健康发展。

目前国内外已有许多文献对包括光伏发电在内的可再生能源消纳影响因素及消纳能力开展研究。文献[7]提出了一种考虑就地消纳与外送相协调的生产模拟模型,能够促进可再生能源的消纳。文献[8]分析了大规模分布式可再生能源接入对配电网运行的影响,对比分析了能够有效促进配电网中分布式可再生能源消纳的电压调节控制策略。文献[9]提出了一种多时段最优直流潮流方法,能够得到使配电网网损最小的分布式可再生能源的最优接入容量。国外对于可再生能源消纳影响因素及消纳特性的分析研究多侧重于配网层面,从电压控制、需求响应、最优潮流等不同技术角度提升可再生能源的消纳水平。我国可再生能源集中式和分布式开发并举,发展迅速,大规模可再生能源接入面临更为突出的消纳难题,因此国内对于可再生能源消纳影响因素及消纳特性的研究也更为全面。文献[10]分析了影响可再生能源消纳的因素并提出促进消纳的优化调度模型。文献[11]详细分析了可再生能源消纳的影响因素并提出了可再生能源消纳影响因素贡献度的概念及评估方法,能够更准确地衡量不同因素对可再生能源消纳能力的影响。文献[12]提出了一种从电网经济性、安全性和固有特性三方面定量评估可再生能源消纳能力的方法,该方法提出了待消纳占比的评价指标并简化了指标的求解步骤。文献[13]针对新能源对配电网的影响提出了两类量化评估的指标和方法,对新能源发电的并网品质、布

局、形式以及新能源发电的并网规模和调峰作用进行了评估。文献[14]基于展开型表述的随机生产模拟技术研究了光伏发电的消纳能力,能够得到系统的光伏发电消纳空间和弃光风险度等指标。此类方法对于可再生能源消纳能力的研究侧重于分析不同约束下电网可消纳的可再生能源电力,通过典型日分析光伏发电量和弃电量等指标,缺少对长时间尺度下可再生能源电量消纳的分析。时序运行模拟技术<sup>[15-16]</sup>通过对电网长时间范围内逐日小时级连续的运行模拟,能够提供电网运行经济性、安全性、环保性等方面的精细化指标,相较于随机生产模拟方法能够更加细致地对电力系统运行状态进行刻画,为可再生能源消纳能力的分析提供了强有力的技术手段。文献[17]对跨区联网容量与送电时序特性进行了研究,采用时序运行模拟技术对可再生能源弃电量及系统运行成本进行了全方位量化评估。文献[18]建立了新能源发电并网仿真模型和生产模拟模型,基于时序生产模拟方法研究了2020年某省级电网规划的风电和光伏发电接入后全年消纳情况。已有研究多将可再生能源弃电量作为研究内容的一个分析依据,且将风电和光伏发电统一分析,仍缺少针对光伏发电消纳能力的研究方法。因此需要提出光伏发电消纳能力的评估方法,对未来高比例光伏发电接入电力系统背景下的光伏发电消纳进行精细化评估。

针对光伏发电消纳能力的评估问题,本文首先引入时序运行模拟技术,建立了高比例可再生能源接入的时序运行模拟框架;然后提出了基于时序运行模拟的可再生能源消纳特性分析方法,利用时序运行模拟计算不同边界条件下光伏发电的弃电量;最后以山东省为例,根据山东光伏发展规划进行了光伏出力运行模拟,并利用所提方法对山东电网2025年光伏发电的消纳能力进行了分析。

## 1 大规模可再生能源并网下时序运行模拟

### 1.1 时序运行模拟

随着电力系统规模的不断增加,光伏发电、风电等间歇性电源的加入,核电、抽水蓄能电站、燃气轮机等多种类型电源的接入以及电网远距离交直流混合输电的格局等因素都极大地增加了电网运行的复杂度<sup>[19-20]</sup>。在复杂电源电网环境下优化系统运行、提升系统的节能经济性、降低系统排放强度成为电网运行面临的重要问题。电网的运行优化涉及系统调峰、复杂电源结构协调、线路断面潮流安全等多方面的因素<sup>[21]</sup>,针对典型运行方式的分析往往仅能实现对系统安全性的评价,而对于系统能耗、成本

以及排放而言过于粗略，需要对电网长时间范围内的运行模拟才能够精细化评价不同调度运行方案的节能性、经济性以及碳排放强度等指标。

光伏发电对地表太阳辐射强度十分敏感，出力具有较强的随机性，大规模光伏发电接入对系统间歇性能源消纳能力产生影响，因此需要精细化再现系统未来运行的情况。时序运行模拟技术通过建立电力系统运行各环节的运行模拟模型、新能源随机运行模拟模型以及各类常规机组运行方式的数学模型，根据电力规划方案，在给定的系统运行模式下，实现系统全年的运行模拟<sup>[22]</sup>。时序运行模拟能够统计系统的成本、能耗、排放、利用效率等多方面的指标，对电网的光伏发电消纳能力进行精细化的量化评估。与随机生产模拟<sup>[23]</sup>不同，时序运行模拟侧重于系统正常状态下的运行，并且能够考虑系统不同的调度运行方式，得到更准确的系统运行成本。时序运行模拟能够对系统长时间维度运行的累积效果进行统计，实现大规模可再生能源并网下精细化的电力电量平衡分析。

### 1.2 含大规模可再生能源并网的电力系统时序运行模拟

大规模可再生能源并网条件下的电力系统时序运行模拟主要包括两方面的技术，一方面要通过随机出力序列重构技术得到考虑可再生能源的随机性、波动性和相关性的出力时间序列<sup>[24-25]</sup>，另一方面要对电力系统详细网络拓扑模型以及线路约束进行精细化建模<sup>[26]</sup>。清华大学开发的电力规划决策支持系统通用软件(Global Optimization Planning Tool for Power System, GOPT)中提供了满足上述技术要求的时序运行模拟模块。该模块以日运行模拟为核心，基于时序负荷曲线，在中长期阶段进行考虑新能源随机运行方式的出力时间序列模拟、电源检修计划的编制以及水电电量的优化分配，以此作为日运行模拟的边界条件。在短期阶段日运行模拟中，考虑电网的一系列运行约束与调度规则，进行考虑多类型电源相互协调的机组组合，实现对电网长时间运行层面精细化的逐日小时级连续模拟，根据逐日运行模拟结果计算系统运行成本、燃料消耗以及污染物排放，同时引入多维度的分析评价指标体系，实现对系统未来运行的全方位评估。

### 1.3 基于时序运行模拟的可再生能源消纳特性分析

对于高比例可再生能源并网的电力系统，可再生能源的发电量与出力特性对电力系统的电源出力结构、运行形态、运行的节能性与经济性等方面具有显著影响<sup>[27]</sup>。对高比例可再生能源的消纳特性进行研究，能够辨识制约高比例可再生能源消纳的关

键因素。将不同的可再生能源消纳影响因素作为电网运行边界条件，能够计算某一边界条件改变时的可再生能源弃电量，进而实现对不同边界下可再生能源弃电量的分析，描述可再生能源消纳特性。

GOPT 中的电力系统时序运行模拟模块能够实现可再生能源消纳的量化分析。基于时序运行模拟技术的可再生能源消纳特性分析框架如图 1 所示。通过长时间周期的运行模拟能够充分考虑风电和光伏的波动性和不确定性，得到原始系统及不同约束条件下较为精确的弃风、弃光量，为可再生能源消纳特性及影响因素分析提供数据基础。

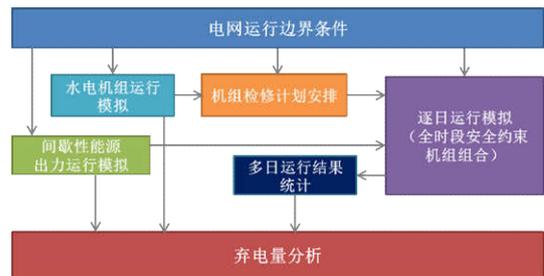


图 1 基于时序运行模拟技术的可再生能源消纳特性分析

Fig. 1 Analysis of renewable energy consumption characteristics based on sequential operation simulation

日运行模拟是基于时序运行模拟技术的可再生能源消纳特性分析的核心部分，其模拟流程如图 2 所示。

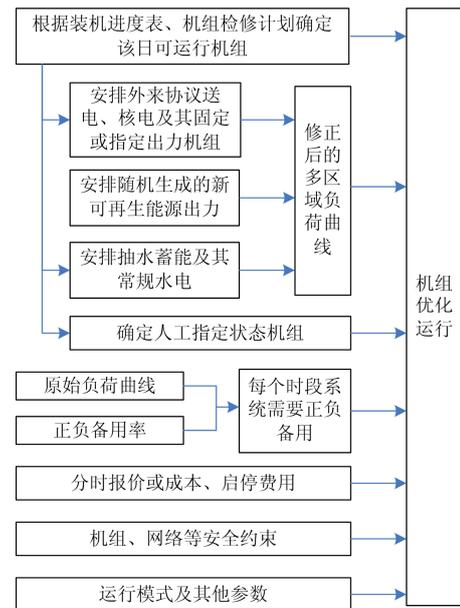


图 2 日运行模拟流程

Fig. 2 Flowchart of daily operation simulation

基于时序运行模拟技术进行可再生能源消纳特性分析时，首先对日运行模拟的目标函数、边界条

件、约束条件进行设置<sup>[26]</sup>。然后将影响可再生能源消纳的因素设置为电网运行边界条件, 例如可再生能源装机容量。通过改变边界条件进行多次时序运行模拟, 能够得到不同装机容量下系统可再生能源的弃电量, 通过弃电量的对比分析研究该边界条件下可再生能源的消纳特性。

## 2 山东省光伏发电规划及运行模拟

### 2.1 山东省太阳能资源及光伏发电规划

山东省太阳能资源较为丰富, 光照资源充足, 全省多年平均年日照时数为 2 479 h, 各地年日照时数基本呈从东北向西南减少的分布趋势。较为丰富的太阳能资源为光伏发电开发利用提供了较为广阔的前景。山东省各城市的太阳能资源及发电小时数概况<sup>[28]</sup>如表 1 所示。

表 1 山东省各城市光伏发电小时数  
Table 1 Photovoltaic power generation hours  
in Shandong Province

城市	水平面	平铺发电	最佳倾角发电小时数/h	
	总辐射 kWh/m <sup>2</sup>	小时数/h	角度	首年
济南	1 340	1 088	30	1 178
青岛	1 451	1 185	34	1 313
淄博	1 314	1 064	32	1 143
枣庄	1 376	1 116	30	1 200
东营	1 402	1 140	33	1 266
烟台	1 456	1 245	35	1 392
潍坊	1 396	1 141	30	1 245
济宁	1 314	1 076	30	1 163
泰安	1 357	1 102	30	1 199
威海	1 462	1 215	30	1 330
日照	1 422	1 167	30	1 261
滨州	1 363	1 115	33	1 219
德州	1 336	1 081	33	1 179
聊城	1 331	1 088	30	1 180
临沂	1 419	1 158	30	1 248
菏泽	1 308	1 070	30	1 131
莱芜	1 375	1 123	33	1 228

山东省太阳能光伏发电呈现多元化、规模化发展态势。截至 2018 年底, 全省光伏发电并网装机容量累计达到 1 361 万 kW, 居全国首位, 占全省总装机容量的比重为 10.4%。2018 年山东省光伏发电量达到 136.8 亿 kW·h, 实现了全额上网消纳。

山东省充分发挥太阳能资源丰富、分布广泛、开发利用基础较好的优势, 根据太阳能资源禀赋、场地条件、电网接入和消纳条件, 坚持集中式、分布式并举, 科学推进光伏电站建设, 大力发展分布式光伏发电。预计到 2025 年, 全省光伏发电装机容量

量达到 1 750 万 kW; 到 2030 年, 全省光伏发电装机容量达到 2 500 万 kW, 太阳能年利用量相当于替代 3 160 万吨标准煤。

### 2.2 山东省光伏发电运行模拟

根据山东电网光伏发展规划方案, 按照光伏电站所属地市将光伏电站分为 17 个光区, 如图 3 所示。为了方便计算, 假设每个光伏片区各自内部天气状况(光伏遮挡因子)在同一时刻基本相同。利用地理位置可以计算出理论情况(晴天)下光伏电站的出力, 利用随机差分方程模拟光伏遮挡因子时, 对于每个时段, 同时生成考虑相关性的 17 个光伏遮挡因子对应不同的光区。



图 3 山东省光伏分区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of photovoltaic division in Shandong Province

根据山东光伏电站的地理位置以及历史出力数据, 设置气象参数典型值、各光区地理参数和光伏电站最佳倾角、各光区天气类型分布概率、光伏电站技术参数等参数, 详见附录 A。

利用 GOPT 软件的新能源出力重构模块对 2025 年山东省光伏发电进行出力重构, 得到全省光伏总发电全年出力结果如图 4 所示, 出力时序曲线与持续曲线如图 5 所示, 全年出力热图如图 6 所示。

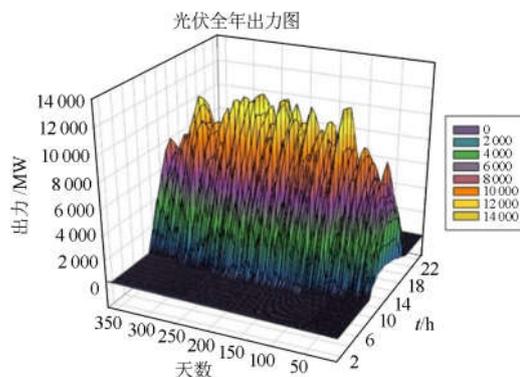


图 4 山东省 2025 年光伏全年出力重构

Fig. 4 Reconstruction of photovoltaic power generation in Shandong Province in 2025

从出力重构结果可以看出光伏出力波动性强, 2025 年山东光伏发电规划装机容量为 17 500 MW, 光伏的平均出力为 2 100.7 MW。在 95%置信度下, 全年光伏最大出力为 10 381.1 MW, 中午 12 时的最小出力为 926.5 MW。

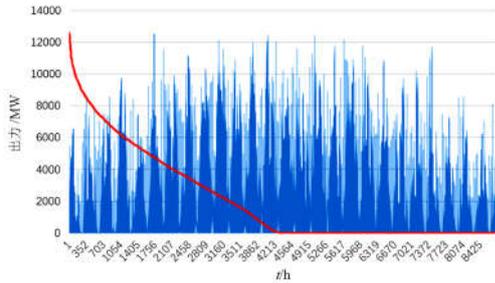


图 5 山东省 2025 年光伏出力重构时序曲线与持续曲线

Fig. 5 Time series curve and continuous curve of photovoltaic power generation in Shandong Province in 2025

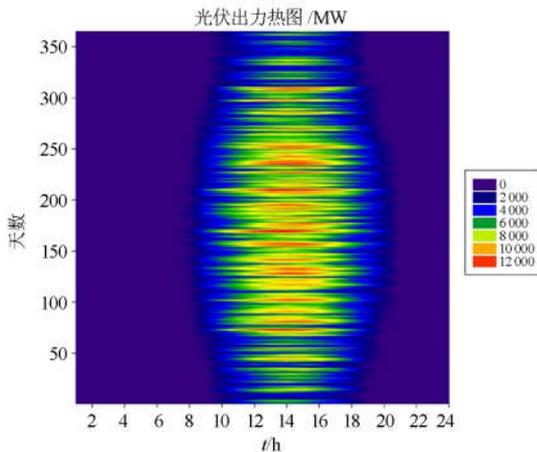


图 6 山东省 2025 年光伏全年出力热图

Fig. 6 Heat map of photovoltaic power generation in Shandong Province in 2025

### 3 山东省光伏发电消纳能力评估

#### 3.1 模拟方案设置

基于上述光伏发电出力模拟方法, 将 2025 年山东省光伏发电的装机规模作为运行边界, 利用 GOPT 软件时序运行模拟模块进行运行模拟, 重点分析不同装机规模下光伏发电的弃电量指标, 判断山东电网规划方案对于光伏发电的消纳能力。此外, 改变风电装机规模, 考虑光伏发电和风电装机容量改变对于可再生能源整体消纳的影响, 并分析系统运行的其他指标, 如利用小时数、电力平衡、电量平衡等。

本文设置了 5 个方案评估山东电网光伏消纳能力, 各方案设置如图 7 所示。在基准方案下, 山东

省 2025 年规划光伏发电装机容量为 17 500 MW, 风电装机容量为 18 500 MW, 此时光伏发电和风电装机总和占山东省全部装机的 22%; 风光 150 方案是指 2025 年山东省光伏发电和风电装机为基准方案规划装机的 150%; 风光 200 方案是指 2025 年光伏发电和风电装机为基准方案的 200%, 此时光伏装机扩大至 35 000 MW, 风电装机扩大至 37 000 MW, 光伏发电和风电装机总和占全部电源装机的比例为 36%; 光伏 200 方案是指光伏发电装机为基准方案的 200%, 风电装机与基准方案相同; 风电 200 方案是指风电装机为基准方案的 200%, 光伏发电装机与基准方案相同。

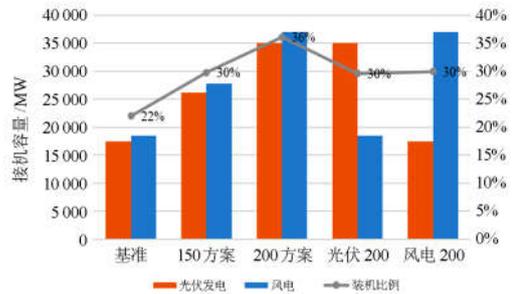


图 7 山东省 2025 年光伏发电与风电装机方案

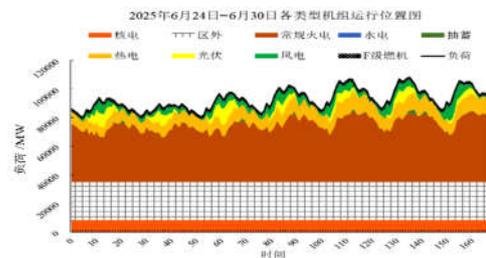
Fig. 7 Photovoltaic power and wind power installation plan in Shandong Province in 2025

#### 3.2 时序运行模拟结果分析

针对上述 5 个技术方案, 分别使用 GOPT 软件时序运行模拟模块对山东电网 2025 年全年的系统运行进行模拟, 得到逐小时的精细化模拟结果。

本文选取 6 月份某一周(6 月 24 日—6 月 30 日)为例, 对不同方案中各类型机组的时序运行结果进行对比分析, 如图 8 所示。

在不同方案下, 各类型机组的时序运行结果存在一定差异, 除区外来电与核电出力保持不变外, 光伏发电和风电装机比例的不同直接改变了火电、燃气发电、抽水蓄能发电机组的运行状态。随着光伏发电和风电装机比例的提升, 其出力也明显增加, 相应地挤压了火电的发电空间, 对燃气发电和抽水蓄能发电机组的运行也产生了一定影响。



(a) 基准方案各类型机组时序运行结果

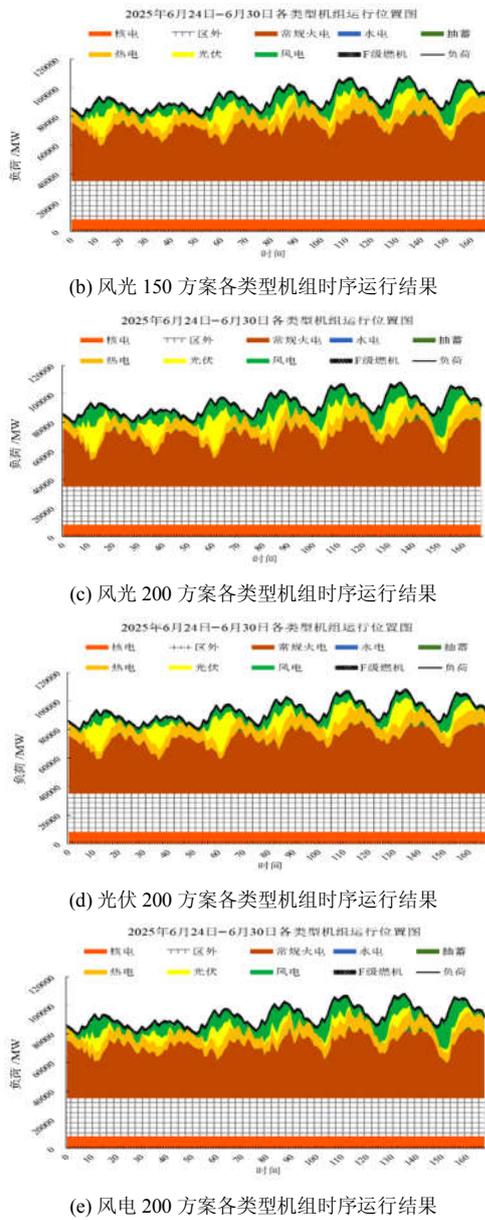


图 8 不同方案中各类型机组的时序运行结果

Fig. 8 Time-sequential operation results of different types of units in different schemes

不同方案下弃风弃光的时序模拟结果如图 9(a) 所示, 可以看出不同方案下弃风弃光结果存在明显差异。对于弃风来说, 除 25 日、26 日外, 其余 5 天的弃风现象都较为明显, 其中弃风电力最大值为风电 200 方案下 24 日 11 时的 2 664.5 MW, 占该时段风电可用出力的 15.02%。弃风电力的增加主要受风电装机容量的影响, 光伏装机容量对弃风的影响较小。对于弃光来说, 24 日、26 日弃光现象较为明显, 25 日、29 日基本没有弃光问题, 弃光电力的最大值为风光 200 方案下 24 日 11 时的 1 133.7 MW,

占该时段光伏可用出力的 5.96%。弃光电力的改变主要受光伏发电装机容量的影响, 光伏发电装机容量为基准规划容量 2 倍的情况下, 弃光问题相较于其他方案更为突出, 但此时弃光电量比例约为 3%, 仍在合理范围内。

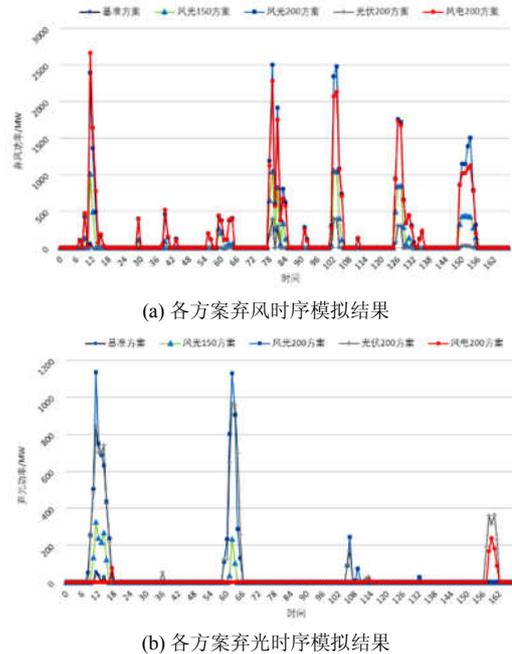


图 9 不同方案下弃风弃光的时序模拟结果

Fig. 9 Time-sequential simulation results of wind and light abandoning under different schemes

### 3.3 电量平衡结果分析

根据 5 个方案全年的系统时序运行模拟结果, 得到电量平衡结果如图 10 所示。

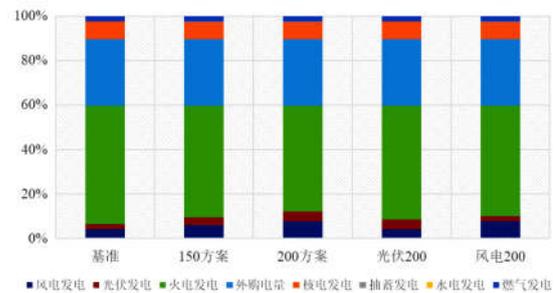


图 10 山东省 2025 年电量平衡模拟结果

Fig. 10 Simulation results of electricity balance in Shandong Province in 2025

由图可以看出: 2025 年山东省发电量占比最高的机组类型为火电机组, 说明山东电网此时仍是以火电为主导电源的电网类型; 区外来电在 2025 年山东电网的电量平衡中占比也较高, 约为 30%; 可再生能源装机规模的扩大提高了可再生能源发电量的

占比，同时使得火电机组的发电量占比逐渐降低；在风电装机高于光伏装机或与光伏装机容量接近的方案中，风电发电量的占比明显高于光伏发电量的占比；在光伏 200 的方案下，光伏发电量与风电发电量较为接近；在风光 200 方案下，光伏发电和风电发电量占全部发电量的比例最高，约为 10%。

### 3.4 弃电量结果分析

基于全年时序运行模拟结果统计光伏发电与风电的弃电情况，得到弃光弃风电量结果如图 11 所示。光伏发电和风电的弃电比例在不同装机规模下的统计结果如图 12 所示。

由图 11 中结果可以看出，在不同可再生能源装机规模下，可再生能源弃电量结果具有明显差异。基准方案下，弃风弃光电量最少，弃光 0.10 亿 kW·h、弃风 2.74 亿 kW·h；随着可再生能源装机规模的扩大，可再生能源弃电量增加较快，光伏发电和风电装机扩大为基准方案的 200% 场景对应可再生能源弃电量最多，其中弃光电量 12.51 亿 kW·h、弃风电量 47.33 亿 kW·h；风电装机规模的扩大对于可再生能源弃电量影响更为明显，装机扩大为基准方案 200% 时，风电弃电量为 3.56 亿 kW·h，略高于基准方案的 2.74 亿 kW·h，此时光伏弃电量为 8.39 亿 kW·h，

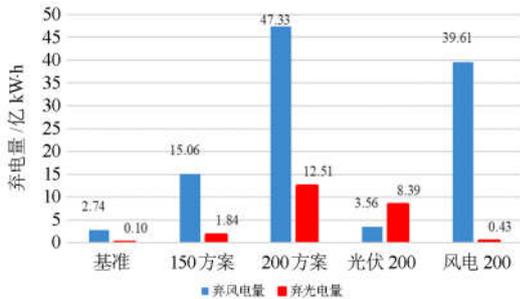


图 11 山东省 2025 年各方案可再生能源弃电量模拟结果  
Fig. 11 Simulation results of renewable energy curtailment in Shandong Province in 2025

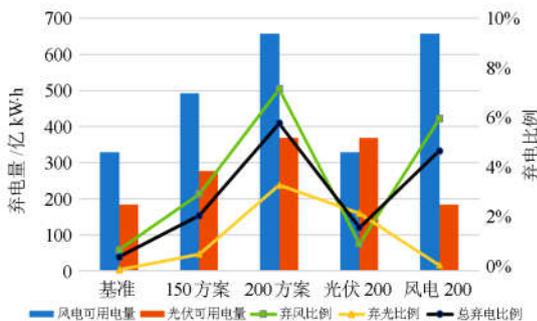


图 12 山东省 2025 年各方案可再生能源弃电比例分析  
Fig. 12 Proportion of renewable energy curtailment in Shandong Province in 2025

小于可再生能源装机 200% 方案下的 12.51 亿 kW·h；风电 200 方案下，风电弃电量较高，达到 39.61 亿 kW·h，接近可再生能源装机 200% 方案下的风电弃电量，但此时光伏弃电量较少，为 0.43 亿 kW·h，接近基准方案的光伏弃电量。

从弃电比例的角度进行分析。基准方案下，风电和光伏发电的电量占比较低，对系统调峰、线路潮流等影响不大，因此弃电比例较低，光伏可用电量约为 184.02 亿 kW·h，弃光电量占光伏可用电量比例约为 0.05%，风电可用电量约为 328.45 亿 kW·h，弃风电量占风电可用电量比例约为 0.83%，总弃电量占可再生能源可用电量总和的比例也为 0.55%；风光 200 方案下，可再生能源弃电比较明显，其中弃光比例约为 3.4%，弃风比例约为 7.2%，总弃电比例约为 5.84%。在山东省 2025 年可再生能源发电的基准规划容量下，基本能够实现可再生能源的全额消纳，当可再生能源发电装机容量扩大为规划容量的两倍时，弃电比例略高于 5%。

上述时序运行模拟、电量平衡、弃电量结果分析表明，在可再生能源不同装机规模下，弃光与弃风呈现出不同的变化特点。随着可再生能源装机比例的提高，弃电量的比例总体呈现出逐渐增加的趋势。对于光伏而言，随着可再生能源总装机规模的扩大，弃光比例不断增加，由基准方案的 0.05% 升高至风光 200% 装机场景下的 3.40%；风电装机 200% 方案下，光伏装机与基准方案一致，弃光比例为 0.24%，与基准方案的 0.05% 比较接近，即风电装机对光伏弃光影响不大；风光 200% 装机方案下弃光比例相比于光伏 200% 装机方案下，弃光比例由 2.28% 增加至 3.40%，可见，随着光伏发电容量的增加，风电对光伏弃光的影响也增加。对于风电而言，弃风比例与风电装机规模的变化趋势较一致，风电装机规模扩大时，弃风比例随之升高；光伏 200% 装机方案与基准方案下弃风比例较为接近，分别为 1.08% 和 0.83%；风电 200% 装机方案下弃风比例也与风光 200% 装机比例下弃风比例差别不大，分别为 6.03% 和 7.20%。

综合上述分析结果，十四五期间山东电网对规划风电与光伏装机消纳能力较强，若风电和光伏发电的增长超过预期，则弃风弃光比例将会急剧增加。此外，风电与光伏的装机还会对弃风弃光比例有交叉影响，在规划的风电光伏装机容量水平上，交叉影响较小，而随着风电光伏装机容量的提升，交叉影响增加。光伏发电装机容量增加对于风电弃电量比例升高的影响要小于风电装机容量增加对弃光比例升高的影响。

## 4 结论

对于大规模可再生能源并网的电力系统, 可再生能源的发电量与出力特性对电力系统各方面都具有显著影响, 而可再生能源的消纳也受到诸多因素的制约。本文对大规模光伏发电接入条件下电网的光伏发电消纳能力进行了研究, 提出了基于时序运行模拟的光伏发电消纳能力分析。利用考虑大规模可再生能源接入的电力系统时序运行模拟方法, 通过改变影响可再生能源消纳的边界条件, 得到不同运行边界下可再生能源的弃电量, 进而分析得出可再生能源的消纳特性和消纳能力。

以山东省为例, 对未来规划电网的光伏发电消纳能力进行了实证分析, 结合山东省光伏发电和风电的发展规划, 重点分析了未来不同规模光伏发电装机并网条件下, 山东电网光伏发电的消纳情况。

结果表明在规划装机规模下, 光伏发电弃电量在合理范围内, 利用率满足要求, 当光伏发电装机规模扩大到规划装机的 2 倍时, 弃光比例约为 2.8%, 仍然保持在合理水平。对于可再生能源消纳而言, 风电装机规模扩大对弃风弃光比例增加的影响高于光伏发电装机规模扩大的影响。

### 附录 A

表 A1 山东省气象参数典型值

Table A1 Typical values of meteorological parameters in Shandong Province

气象参数	参数值
晴空指数概率分布参数 $C$	0.299 4
晴空指数概率分布参数 $\lambda$	5.062
晴空指数概率分布参数 $\theta$	0.034 3
地面反射率	0.2
大气散射系数 $p$	1.030 3
大气散射系数 $q$	1.151 5

表 A2 山东省各光区地理参数和天气类型分布概率

Table A2 Geographical parameters and distribution probability of weather type in each photovoltaic power generation zone in Shandong Province

地区	地理参数			光伏电站 最佳倾角	天气类型 1	天气类型 2	天气类型 3	天气类型 4
	经度	纬度	海拔		概率(晴)	概率(多云、雾)	概率(阴、雨、雪)	概率(其他)
济南	117	36	149	30	0.57	0.26	0.14	0.03
青岛	120	36	6	34	0.56	0.28	0.13	0.03
淄博	118	37	38	32	0.56	0.26	0.13	0.05
枣庄	118	35	89	30	0.51	0.28	0.14	0.07
东营	118	37	3	33	0.61	0.25	0.13	0.01
烟台	121	38	4	35	0.59	0.28	0.12	0.01
潍坊	119	37	31	30	0.57	0.26	0.13	0.04
济宁	117	35	39	30	0.53	0.27	0.12	0.08
泰安	117	36	167	30	0.57	0.26	0.14	0.03
威海	122	38	22	30	0.58	0.28	0.13	0.01
日照	119	35	37	30	0.56	0.28	0.13	0.03
滨州	118	37	9	33	0.61	0.25	0.12	0.02
德州	116	37	23	33	0.57	0.25	0.12	0.06
聊城	116	36	37	30	0.55	0.26	0.13	0.06
临沂	118	35	68	30	0.54	0.27	0.12	0.07
菏泽	115	35	54	30	0.54	0.27	0.12	0.07
莱芜	117	36	197	33	0.55	0.26	0.14	0.05

表 A3 山东省光伏电站典型技术参数

Table A3 Typical technical parameters of photovoltaic power plants in Shandong Province

类别	光伏电站	分布式光伏
光伏阵列类型选择	倾角单轴	固定倾角
光伏组件单元个数	25	25
光伏阵列方向角	0	0
光伏板可用率	1	1
预测绝对误差占装机容量百分比	13%	17%

### 参考文献

- [1] 昌力, 庞伟, 严兵, 等. 可再生能源跨区现货市场技术支持系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 158-165.
- CHANG Li, PANG Wei, YAN Bing, et al. Design of renewable energy inter-regional spot market operation support system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 158-165.

- [2] 国家能源局. 2018 年可再生能源并网运行情况介绍 [EB/OL]. [2019-03-15]. [http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c\\_137780519.html](http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780519.html).
- [3] 中电联行业发展与环境资源部. 2018 年电力统计年快报基本数据一览表 [EB/OL]. [2019-03-15]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/2019-01-22/188396.html>.
- [4] LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter-provincial tie-line[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 1-12. DOI: 10.1186/s41601-019-0115-7.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 清洁能源消纳行动计划(2018-2020 年)[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2018.
- [6] 宋淼, 王克文. 主动配电网中考虑空间与时间相关性的分布式光伏并网规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 106-114.  
SONG Miao, WANG Kewen. Planning of distributed PV grid-access considering the space and time correlation in active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 106-114.
- [7] 崔德民, 赵海兵, 方燕琼, 等. 考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源生产模拟[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 112-118.  
CUI Demin, ZHAO Haibing, FANG Yanqiong, et al. Renewable energy production simulation considering the coordination between local consumption and transmission[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 112-118.
- [8] LAMADRID A J. Optimal use of energy storage systems with renewable energy sources[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 71: 101-111.
- [9] OCHOA L F, HARRISON G P. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 198-205.
- [10] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(17): 18-25.  
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(17): 18-25.
- [11] 李海, 张宁, 康重庆, 等. 可再生能源消纳影响因素的贡献度分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(4): 1009-1017.  
LI Hai, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analytics of contribution degree for renewable energy accommodation factors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(4): 1009-1017.
- [12] 蔡佳铭, 林其友, 刘涌. 高占比可再生能源系统消纳能力指标评估与分析[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(7): 53-61.  
CAI Jiaming, LIN Qiyu, LIU Yong. Index analysis and evaluation of high proportion renewable energy system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(7): 53-61.
- [13] 李妍, 王洁, 王少荣, 等. 计及新能源特性的配电网评估指标及其隶属度函数的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(8): 43-49.  
LI Yan, WANG Jie, WANG Shaorong, et al. Research on evaluation indices of new energy generation characteristics and membership functions[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 43-49.
- [14] 罗定, 刘艳. 基于随机生产模拟的光电消纳能力评估[J]. *分布式能源*, 2018, 3(2): 9-15.  
LUO Ding, LIU Yan. Evaluation of PV absorptive capacity based on probabilistic production simulation[J]. *Distributed Energy*, 2018, 3(2): 9-15.
- [15] 杨柳, 吴鸿亮, 门钺. 南方电网节能与经济运行评价方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 31-38.  
YANG Liu, WU Hongliang, MEN Kun. An energy saving and economy operation evaluation method for china southern power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(17): 31-38.
- [16] 黄俊辉, 谈健, 杨俊义, 等. 基于电力系统运行模拟的江苏输电网规划方案网损实证分析[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 39-42.  
HUANG Junhui, TAN Jian, YANG Junyi, et al. Empirical analysis on transmission loss of jiangsu power grid planning based on power system operation simulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(17): 39-42.
- [17] 吴迪, 王佳明, 李晖, 等. 以促进可再生能源消纳为目标的我国西北-西南联网容量与送电时序研究[J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2103-2110.  
WU Di, WANG Jiaming, LI Hui, et al. Research on capacity and delivery sequence of interconnected northwestern-southwestern power grid towards renewable energy accommodation[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2103-2110.
- [18] 姚明侠, 杨超, 陈国华, 等. 基于时序生产模拟的新能源消纳能力分析[J]. *江西电力*, 2018, 42(8): 10-14.  
YAO Mingxia, YANG Chao, CHEN Guohua, et al. Analysis of new energy consumption capacity based on

- sequential production simulation[J]. *Jiangxi Electric Power*, 2018, 42(8): 10-14.
- [19] 晏鸣宇, 艾小猛, 张艺镛, 等. 考虑机组禁止运行区间的含风电鲁棒机组组合[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(11): 3195-3203.
- YAN Mingyu, AI Xiaomeng, ZHANG Yipu, et al. Robust unit commitment with the consideration of the generator prohibited zones under the penetration of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(11): 3195-3203.
- [20] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [21] YAN Mingyu, AI Xiaomeng, WEN Jinyu, et al. Decentralized optimization for multi-area optimal transmission switching via iterative ADMM[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-10, 2018, Portland, OR, USA: 1-5.
- [22] 黄俊辉, 谢珍建, 祁万春, 等. 基于时序运行模拟的电网运营效率评估方法[J]. *电力建设*, 2015, 36(10): 123-128.
- HUANG Junhui, XIE Zhenjian, QI Wanchun, et al. Operation efficiency assessment approach for power grid based on sequential operation simulation[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(10): 123-128.
- [23] 王锡凡, 王秀丽. 随机生产模拟及其应用[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(8): 10-15.
- WANG Xifan, WANG Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(8): 10-15.
- [24] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(6): 6-13.
- ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(6): 6-13.
- [25] ZHANG N, KANG C, DUAN C, et al. Simulation methodology of multiple wind farms operation considering wind speed correlation[J]. *International Journal of Power and Energy Systems*, 2010, 30(4): 264-273.
- [26] ZHANG N, KANG C, KIRSCHEN D S, et al. Planning pumped storage capacity for wind power integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 393-401.
- [27] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(12): 177-187.
- LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 177-187.
- [28] 智汇光伏. 山东省光伏项目投资内参[EB/OL]. [2019-03-15]. [http://www.sohu.com/a/129748539\\_418320](http://www.sohu.com/a/129748539_418320).
- 
- 收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-06-28
- 作者简介:
- 田鑫(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网规划、节能低碳等;
- 张健(1989—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统运行模拟、可再生能源消纳、强化学习; Email: zhangjian18@tsinghua.edu.cn
- 李雪亮(1965—), 男, 教授级高工, 研究方向为电网规划与管理。
- (编辑 葛艳娜)